



Comportement à températures élevées des mortiers avec fibres polypropylène

Mohammed Ezziane, Tahar Kadri, Raoul Jauberthie, Laurent Molez

► To cite this version:

Mohammed Ezziane, Tahar Kadri, Raoul Jauberthie, Laurent Molez. Comportement à températures élevées des mortiers avec fibres polypropylène. CITEDUB2: The 2nd International Congress on Technology and Concrete Durability, Nov 2011, Algérie. hal-01005630

HAL Id: hal-01005630

<https://hal.science/hal-01005630>

Submitted on 13 Jun 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

COMPORTEMENT A TEMPERATURES ELEVEES DES MORTIERS AVEC FIBRES POLYPROPYLENE

EZZIANE Mohammed*, KADRI Tahar* & JAUBERTHIE Raoul**, MOLEZ Laurent**

* Laboratoire LMPC, Université de Mostaganem-27000, Algérie,
ezzmed44@yahoo.fr, kadriurss@yahoo.fr

** Laboratoire GCGM, INSA – Université de Rennes, France,
raoul.jaubertie@insa-rennes.fr, laurent.molez@insa-rennes.fr

1. RESUME

De nombreux travaux ont permis d'analyser et comparer le comportement mécanique du mortier normalisé et le comportement du mortier similaire mais renforcé de fibres polypropylène. Le but de notre étude est essentiellement expérimental, il a pour objet d'analyser le comportement de 2 matériaux : l'un non fibré et l'autre avec des fibres polypropylène, après incendie (plus exactement après différents chauffages avec variation des paramètres température du palier et rampe de chauffage).

Pour mieux simuler les incendies, un test à la flamme de gaz propane est mis au point. Les différents matériaux précités sont soumis à cet échauffement brutal. L'évolution du gradient de température à l'intérieur des échantillons est suivie et, en fin d'exposition, le comportement mécanique des mortiers sont comparés à l'aide d'un essai de poinçonnement.

A température ambiante et après des chauffages inférieurs à 500°C, les résistances en flexions sont nettement améliorées par la présence de fibres. Le module de Young résiduel est voisin voir légèrement supérieur pour les échantillons avec fibres. Au fur et à mesure que la température croît l'augmentation de résistance s'amenuise. Au-delà de 500°C, les résistances en flexion sont plus faibles pour les matériaux fibrés. Pour le module de Young l'effet des fibres s'estompe et devient négatif après 500°C. Des observations similaires sont faites pour l'énergie de fissuration : elle est nettement améliorée (quasiment multipliée par 2) pour les mortiers fibrés à température ordinaire. Cette amélioration décroît progressivement pour s'annuler à 400°C. Au delà de cette valeur, l'introduction de fibres poly propylène entraîne une diminution de l'énergie de fissuration.

L'essai à la flamme est nettement plus discriminant. La température en face chaude atteint en quelques dizaines de secondes les 1000°C et est maintenue à cette température. Dans ces conditions et après 1h d'exposition la face froide atteint 100°C. Après refroidissement, la résistance au poinçonnement du mortier fibré est nettement plus faible que celle du mortier sans fibres.

Mots clefs: Mortier fibré, Fibres polypropylènes, Température, Incendie.

2. INTRODUCTION

Les fibres de polypropylène sont utilisées dans les mortiers et bétons pour diminuer le retrait plastique, les fissurations et les micro-fissurations essentiellement de surface. Elles augmentent la cohésion apparente et réduisent l'affaissement. Les fibres sont généralement considérées comme apportant une amélioration de la résistance au gel. Si les fibres métalliques améliorent la résistance au feu [1], l'effet des fibres polypropylène est plus contesté. Seul l'effet limitant l'écaillage aux hautes températures est à peu près unanimement reconnu. Cette action est essentiellement étudié dans les bétons haute résistance c'est-à-dire à faible rapport eau/ciment [2, 3, 4].

3. MATERIAUX UTILISES

Le choix des fibres de renforcement est effectué en tenant compte des données structurales et géométriques. Notre étude porte sur le comportement des mortiers fibrés en température : nous avons donc choisi des fibres polypropylène. La géométrie des fibres doit être sélectionnée en tenant compte de la taille des granulats. En effet, le pontage des fissures n'est efficace que si la longueur des fibres est plus importante que la taille maximale des granulats [2]. Les fibres de polypropylène (fibres

synthétiques), quand à elles, entrent en action de manière plus progressive en pontant les macro fissures et permettent de maintenir une résistance post-pic élevée jusqu'à des ouvertures très larges. Les caractéristiques des fibres (données fournisseur : SIKA) sont détaillées dans le tableau 1.

Tableau 1: Caractéristiques des fibres utilisées (données SIKA).

Fibre	Longueur L (mm)	Diamètre \varnothing (μm)	Rapport L/\varnothing	Masse volumique ρ (kg/m^3)	Module d'élasticité E [GPa]	Fusion [°C]	Résistance en traction σ [GPa]
Polypropylène	12	18	667	910	6	170	0,55

L'aspect des fibres est observé au MEB à effet de champ, il est reporté fig. 1. Le diamètre est de l'ordre de 25 μm . La surface est relativement régulière, seules quelques stries apparaissent longitudinalement.

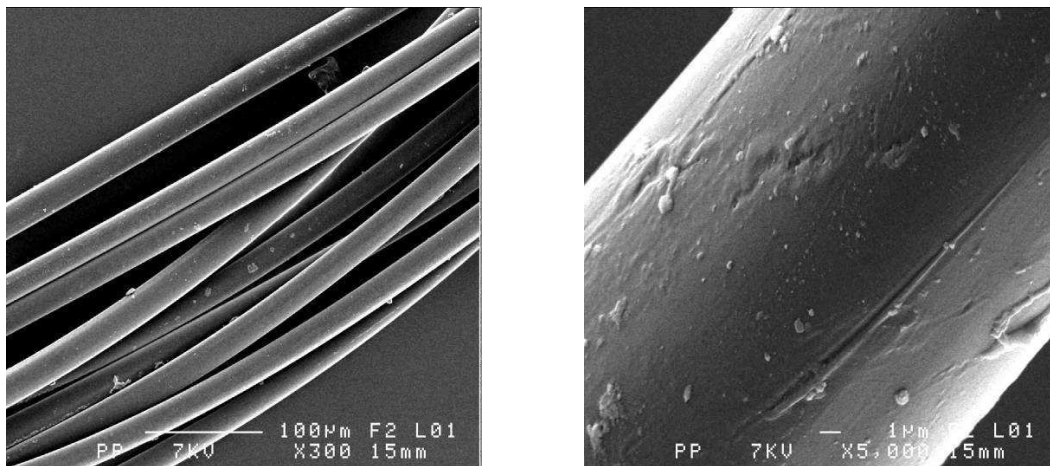


Fig.1 : Observations au MEB des fibres polypropylène.

Le ciment Portland utilisé est un CEM I 52,5 N CE CP2 NF de l'usine du Teil, commercialisé par Lafarge. Ce ciment est constitué principalement de 95% de clinker, dont le détail des compositions chimique et minéralogique (Bogue) est reporté sur le tableau 2.

Les mortiers sont confectionnés avec un sable normalisé CEN 196-1 conforme à la norme ISO 679. Les proportions massique de ciment, de sable et d'eau sont respectivement 1 : 3 : 0,5. La proportion volumique de fibres ajoutées dans les mortiers fibrés est de 0,58%.

Tableau 2: Composition chimique et minéralogique du ciment CEM I 52,5.

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	NaO ₂	SO ₃	RI	PAF	CaO ₁
%	22,40	2,96	2,33	66,60	0,95	0,15	0,10	2,13	0,20	1,59	0,50
	C ₃ S = 65,3			C ₂ S = 18,6		C ₃ A = 4,35		C ₄ AF = 7,14			

A noter : RI : résidus insolubles ; PAF : perte au feu ; CaO₁ : chaux libre

4. CHAUFFE LENTE

Les échantillons 4x4x16 cm³ sont chauffés dans un four jusqu'à la température de consigne avec une rampe de 2°C.min⁻¹, le palier est fixé à 1h et le refroidissement s'effectue dans le four fermé jusqu'à température ambiante (environ 0,3°C.min⁻¹). Ils sont ensuite testés en flexion 4 points.

Les résultats d'essais de flexion monotone effectués sur le mortier non renforcé (MN) et sur les mortiers renforcés de fibres polypropylène (MNP) sont présentés sur la figure 2. L'effort résiduel, post pic, met clairement en évidence, le rôle des fibres lorsque l'échantillon n'est pas chauffé. La reprise des efforts de part et d'autre des fissures par leur intermédiaire est importante et se traduit par une ductilité accrue. Comme l'ont déjà observé d'autres auteurs [5], ce phénomène s'atténue très rapidement entre 400 et 500°C pour disparaître à 500°C. La figure 3 représente l'évolution de la résistance en flexion en fonction de la température. Comme précédemment, les fibres polypropylène

ont un rôle positif (mais qui s'atténue) jusqu'à 400°C comme il a été constaté précédemment. Les valeurs littérales sont reportées tableau 3

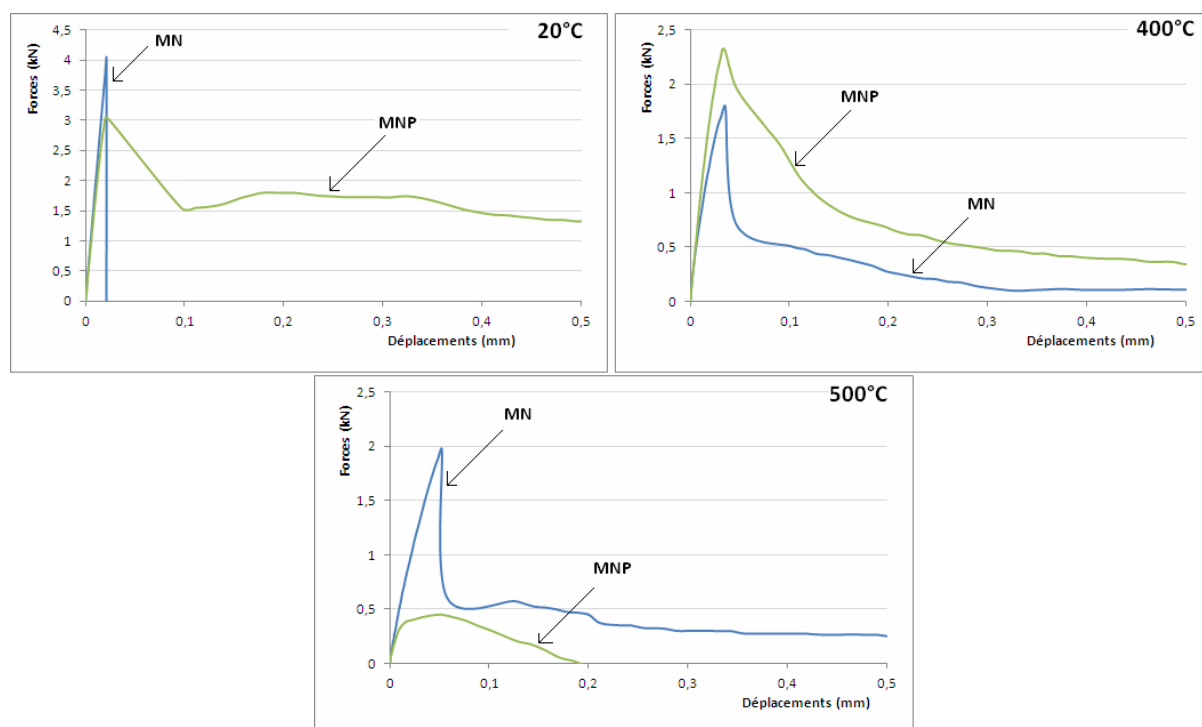


Fig. 2: Courbes de comportement du mortier non renforcé (MN) et renforcé de 0,58% volumique de fibres polypropylène (MNP) en flexion 4 points.

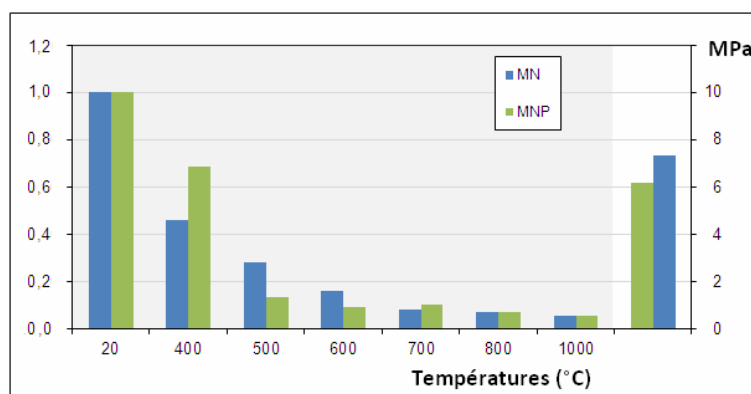


Fig. 3 : Evolution des résistances à la traction par flexion 4 points des mortiers en fonction de la température du traitement thermique avec une rampe de 2°C/mn. (A gauche valeurs normalisées, à droite résistance à 28 jours)

Tableau 3 : Evolution de la contrainte de traction par flexion (MPa) en fonction de la température.

Mortier	T°C	20°C	400°C	500°C
MN		7,31	3,36	2,04
MNP		6,16	4,24	0,84

Le module d'Young résiduel en fonction de la température de chauffe est reporté figure 4 et tableau 4. Les échantillons fibrés présentent un module plus grand que les échantillons non fibrés avec

un écart qui s'accroît jusqu'à 400°C et, au-delà, il diminue. A 500°C, ils sont identiques. Puis le module d'Young des échantillons fibrés devient quasiment nul.

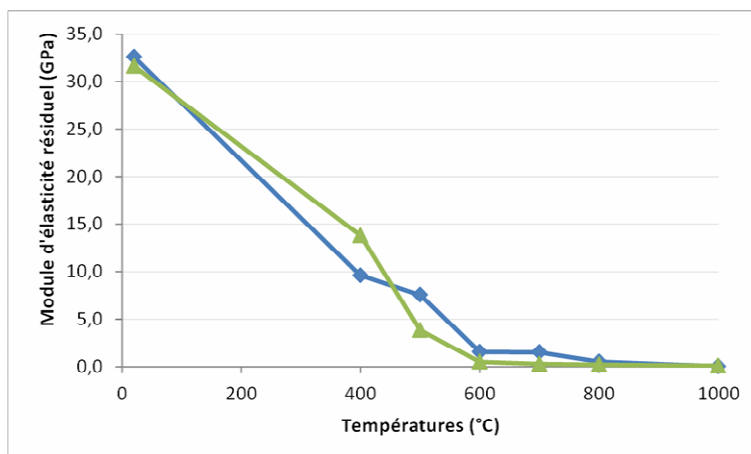


Fig. 4 : Evolution du module d'élasticité résiduel en flexion 4 points des mortiers en fonction de la température du traitement thermique.

Tableau 4 : Evolution du module d'élasticité (GPa) en fonction de la température.

Mortier	T°C	20°C	400°C	500°C
MN		32,6	9,6	7,5
MNP		31,6	13,8	3,8

L'énergie de fissuration est calculée à partir de l'aire sous la courbe contrainte déformation de la flexion 4 points [6]. Les résultats sont reportés en fonction de la température de chauffage sur la figure 5 et reportés tableau 5. L'énergie de fissuration est environ 3 fois plus importante pour l'échantillon fibré par rapport à l'échantillon non fibré lorsqu'ils n'ont pas été chauffés. Ce bénéfice s'atténue progressivement pour s'annuler à 500°C.

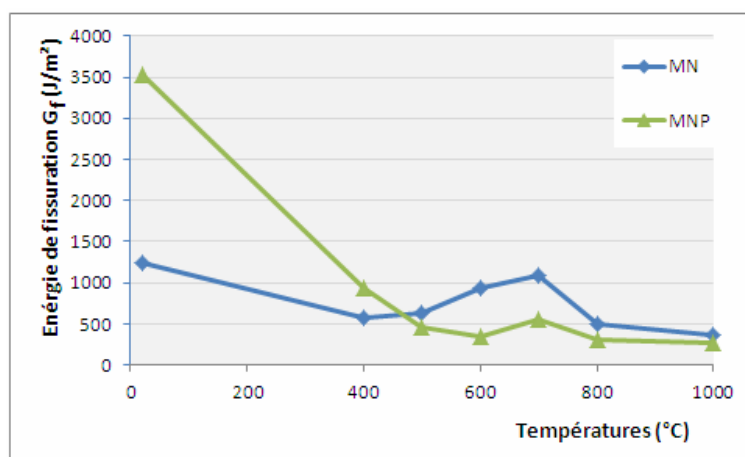


Fig. 5 : Evolution de l'énergie de fissuration en fonction de la température.

Tableau 5 : Evolution de l'énergie de fissuration G_f (J/m²) en fonction de la température.

Mortier	T°C	20°C	400°C	500°C
MN		1234	577	639
MNP		3531	943	468

Le facteur d'intensité de contrainte K_I caractérise la résistance du matériau à la propagation de la fissure et à l'endommagement [7]. Ce paramètre peut être déduit du calcul de l'énergie de fissuration G_f .

Il est défini par la relation suivante : $K_I = (G_f \cdot E)^{0.5}$

Les évolutions des facteurs d'intensité des contraintes des mortiers en fonction de la température sont tracées sur la figure 6 et reportées tableau 6.

Nous observons les mêmes tendances que celles constatées pour l'énergie de fissuration. Les résultats confirment que le mortier renforcé de fibres polypropylène présente un facteur d'intensité K_I élevé à la température de 400°C. Au-delà de cette température, on observe une chute plus marquée du facteur d'intensité due, probablement, à la fusion totale de fibres polypropylène.

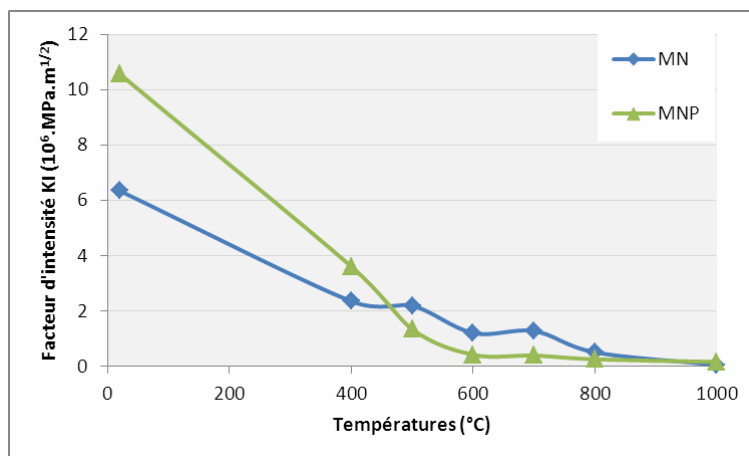


Fig. 6 : Evolution du facteur d'intensité K_I en fonction de la température.

Tableau 6 : Evolution de facteur d'intensité K_I (10^6 MPa.m^{1/2}) en fonction de la température.

Mortier	T°C	20°C	400°C	500°C
MN		6,341	2,353	2,195
MNP		10,568	3,607	1,338

Plusieurs phénomènes peuvent expliquer les observations précédentes. A hautes températures, deux types d'endommagement apparaissent : (1) des modifications physico-chimiques et (2) une fissuration de la matrice cimentaire [8, 9 et 10]. Dans une étude précédente [11], nous avons montré que les fibres de polypropylène avaient un effet nettement plus marqué sur la réduction de la fissuration que sur la réduction des modifications physico-chimiques. A partir de 170°C, les fibres de polypropylène fondent et créent une porosité connectée. Cette porosité permet d'évacuer les surpressions de vapeur et donc de réduire la fissuration. Cette plus faible fissuration permet d'expliquer les meilleurs résultats en terme de résistance, ductilité, d'énergie de fissuration ou de facteur d'intensité de contrainte.

De plus, lorsque la température du four est à 400°C, le palier n'est peut être pas suffisamment long pour détruire toutes les fibres. En effet, la propagation de la chaleur est ralentie dans la matrice cimentaire déshydratée [8, 9 et 10]. Les fibres disparaissent progressivement de la périphérie de l'échantillon vers le cœur : la cinétique de propagation de la chaleur est freinée par la matrice cimentaire déshydratée plus ou moins isolante. Des fibres subsistent au cœur de l'échantillon et contribuent à la ductilité du matériau. Au-delà de 500°C, tout laisse penser que les fibres ont totalement disparu pour laisser une porosité supplémentaire [12, 13, 14, 15 et 16]. Cette porosité conduit ainsi à une énergie plus faible que les échantillons non fibrés.

5. ESSAI A LA FLAMME

La deuxième série de traitement thermique consiste à placer des plaques de $16 \times 16 \times 4 \text{ cm}^3$ en mortier normal et en mortier fibré dans un appareillage permettant de réaliser des essais à la flamme (figure 7a).

La température de la face exposée à la flamme est fixée à 1000°C et maintenue pendant une heure. Des thermocouples ont été placés (figure 7c) dans les éprouvettes à différentes profondeurs (face externe, 2 cm, 2,5 cm, 3 cm, 3,5 cm, 4 cm et face interne) pour suivre l'évolution du gradient thermique. A la fin de l'essai, le refroidissement est effectué à l'air ambiant. Par la suite, des essais mécaniques de poinçonnement sont réalisés à titre comparatif.

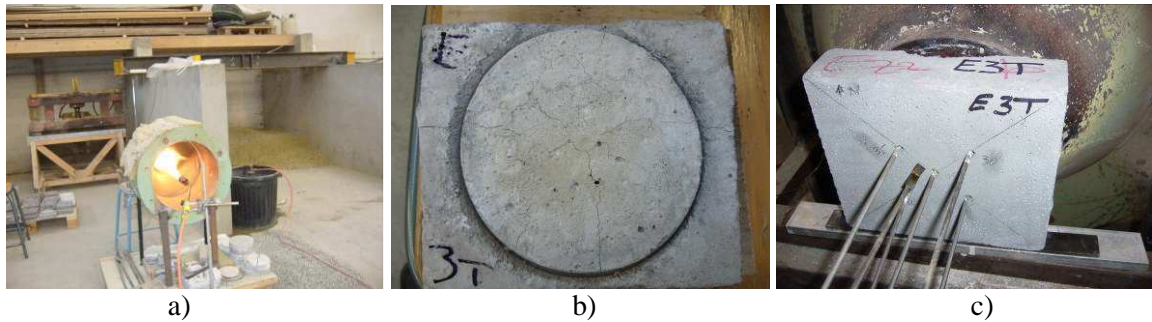


Fig. 7 : a) montage essai à la flamme, b) fissuration coté exposé, c) positionnement des thermocouples.

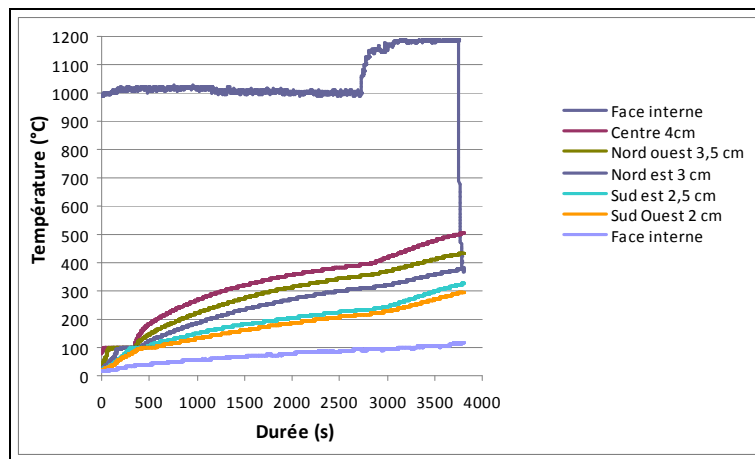


Fig. 8 : Evolution de la température à différentes profondeurs du mortier non fibré.

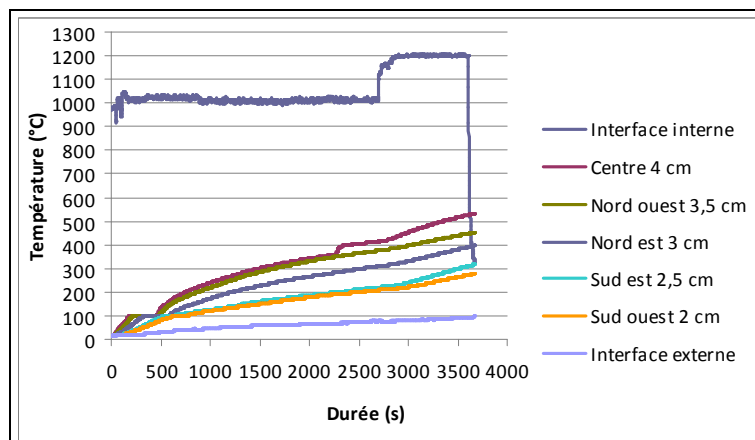


Fig. 9 : Evolution de la température à différentes profondeurs du mortier fibré (polypropylène).

Durant ces essais, nous avons observé, après 5 minutes de traitement, des gouttes d'eau ainsi que de la vapeur s'échapper par le percage des thermocouples de la surface non exposée de l'éprouvette, ceci pour les deux types de mortier. Après 9 mn de traitement, nous avons observé un état d'endommagement (apparition de la 1^{ère} fissuration est-ouest) important de mortier normal. Les figures 8 et 9 tracent l'évolution des températures du mortier non fibré et du mortier fibré au cours de l'essai en fonction du temps et de la profondeur.

Les plateaux à 100°C que l'on peut observer au début de l'essai correspondent à l'évaporation de l'eau libre aux différentes profondeurs. Plus on s'éloigne de la face interne (face à la flamme), plus ces plateaux apparaissent tardivement. On peut ainsi quantifier la propagation de la chaleur dans les deux mortiers. Pour vérifier ce transfert, des plaques ont été testées sans percement (sans thermocouples), seules les températures en face chaude et en face froide sont mesurées. La présence de fibres polypropylène n'entraîne pas de modifications sensibles dans le phénomène de propagation de la chaleur.

Après cet essai, les plaques sont poinçonnées (fig. 10) afin de comparer l'effort résiduel de chacune d'entre elles. Les résultats sont reportés tableau 7. Les mortiers fibrés présentent des chutes de résistance au poinçonnement importantes par rapport aux mortiers non fibrés dans ce test à la flamme. Il est évident que la température de 1000°C en face chaude et ceci pendant 1h a complètement détruit les fibres et ceci jusqu'à 1cm environ de la face froide. Il est donc logique que la porosité induite par ce départ des fibres diminue la résistance. On constate que les plaques percées pour placer les thermocouples ont une résistance plus faible.

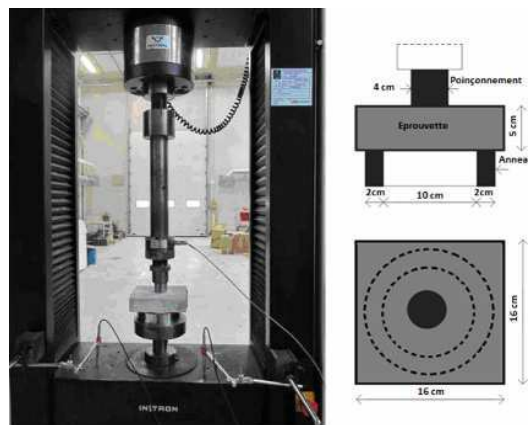


Fig. 10 : Banc d'essai au poinçonnement

Mortiers	F_{\max} (kN)
Non fibré percé	7,028
Non fibré	7,234
Fibré percé	4,645
Fibré	5,535

Tableau 7 : Effort de poinçonnement résiduel des plaques après tests à la flamme.

5. CONCLUSIONS

Cette étude a mis en évidence l'apport de fibres propylène dans les matériaux de constructions à base cimentaire lors d'augmentations de températures ou bien d'exposition à la flamme. Pour cela, nous avons étudié le comportement mécanique de mortiers ordinaires et de mortiers renforcés de fibres polypropylène, traités thermiquement à 400°C, 500°C, 600°C, 700°C, 800°C et 1000°C. Deux types de traitement ont été réalisés : un chauffage au four et un chauffage brutal à la flamme.

Dans le cas d'un chauffage au four, l'effort résiduel, post pic, met clairement en évidence, le rôle des fibres lorsque l'échantillon n'est pas chauffé. La reprise des efforts de part et d'autre des fissures par leur intermédiaire est importante et se traduit par de la ductilité. En dessous de 400°C, en plus de

cet effet de « couture », les fibres ont un rôle « anti-fissuration » en permettant l'évacuation des surpressions de fluides dans la matrice. Ce phénomène s'atténue très rapidement entre 400 et 500°C pour disparaître à 500°C.

Les échantillons fibrés présentent un module d'Young plus grand que les échantillons non fibrés avec un écart qui s'accroît jusqu'à 400°C et diminue au-delà. À 500°C, ils sont identiques. Le module d'Young des échantillons fibrés devient quasiment nul après 500°C. L'énergie de fissuration est, à 20°C, trois fois plus grande pour les échantillons fibrés par rapport aux échantillons non fibrés. Ce rapport chute à 1,5 à 400°C. L'effet du fibrage est négatif au-delà de 500°C.

Des essais à la flamme il ressort que, au point de vue protection thermique le mortier fibré joue parfaitement son rôle. La face non exposée est à 100°C après une heure. Les résultats sont plus mitigés pour les résistances résiduelles au poinçonnement. Le fibrage polypropylène limite la fissuration du mortier lors de la chauffe mais ceci ne se traduit pas par une augmentation de la résistance au poinçonnement.

Des essais complémentaires, tels qu'initiés dans un article précédent [11] sont envisagés avec des fibrages mixtes polypropylène et acier.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Lie T.T. and Kodur V.K.R., Thermal and mechanical properties of previous steel fibre-reinforced concrete at elevated temperature. *Can J Civil Eng*, 23 2 (1996), pp. 511–517
- [2] Serdar A., Halit Y., Bülent B., High temperature resistance of normal strength and autoclaved high strength mortars incorporated polypropylene and steel fibers, *Construction and Building Materials*, Volume 22, Issue 4, April 2008, Pages 504-512.
- [3] Bilodeau A, Kodur V.K.R, Hoff G.C, Optimization of the type and amount of polypropylene fibres for preventing the spalling of lightweight concrete subjected to hydrocarbon fire. *Cement and Concrete Composites*, Volume 26, Issue 2, February 2004, Pages 163-174.
- [4] Nishida A, Yamazaki N, Inoue H, Schneider U, Diederichs U. Study on the properties of high strength concrete with short polypropylene fibre for spalling resistance. In: Sakai K, Banthia N, Gjorv OE (editors). *Concrete under severe conditions: environment and loading*, vol. 2. 1995. p. 1141–50.
- [5] Pliya, P., Beaucourt, A.I.; Noumowé, A. Influence des fibres de polypropylène sur le comportement de bétons soumis à une température élevée. *Colloque International sur la caractérisation et modélisation des matériaux et structures*, Tizi-Ouzou, Algérie 2008.
- [6] Guo X.H., Tin-Loi F., Li H. Determination of quasibrittle fracture law for cohesive crack models. *Cement and Concrete Research* 29 1999. p. 1055–1059.
- [7] Charmet J.C, Mécanique du solide et des matériaux: Elasticité-Plasticité-Rupture, ESPCI - Laboratoire d'Hydrodynamique et Mécanique Physique. p. 113-144.
- [8] Georgali B., Tsakiridis P. E. Microstructure of fire-damaged concrete. A case study. *Cement and Concrete Composites*, Volume 27, 2005, p. 255-259.
- [9] Fu Y.F., Wong Y.L., Poon C.S., Tang C.A., Lin P. Experimental study of micro/macro crack development and stress-strain relations of cement-based composite materials at elevated temperatures, *Cement and Concrete Research*, 33, 2004, p. 789-797.
- [10] Fares H., Noumowé A., Remond S. Self-consolidating concrete subjected to high temperature. Mechanical and physicochemical properties, *Cement and Concrete Research*, 39, 2009, 1230–1238.
- [11] Ezziane M.; Molez L.; Jaubertie R.; Rangeard D. Heat exposure tests on various types of fibre mortar. *European journal of environmental and civil engineering*, 2011, vol. 15, No. 5, 715-726
- [12] Kalifa, P., Chéné, G., Gallé, C., High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres from spalling. *Cement and Concrete Research*. Vol.31, 2001, p. 1487-1499.
- [13] Noumowé, N.A., Clastres, P., Debicki, G., Costaz, J.L. Transit heating effect on high strength concrete. *Nuclear Engineering and Design*. Vol.166. 1996, p 99-108.
- [14] Komonen, J., Penttala, V. Effect of high temperature on the pore structure and strength of plain and polypropylene fiber reinforced cement pastes. *Fire Technology* 2003, 39(1), pp. 23-34.
- [15] Hager, I., Tracz, T. Residual transport properties of heated HPC modified with polypropylene fibers. *1st International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure. Proceedings*, F. Dehn, E.A.B. Koenders, 2009, p. 221-228.
- [16] Min, Li, Chun xiang, Q., Sun, W. Mechanical properties of high-strength concrete after fire. *Cement and Concrete Research*. Vol.34, 2004, p 1001-1005.